

축소-확대 유로에 적용한 횡류형 수직 풍력발전시스템의 개발

정 상 훈, 정 광 섭*, 김 철 호**†

서울과학기술대학교 NIT융합대학원, *서울과학기술대학교 건축학부, **서울과학기술대학교 자동차공학과

Development of a Cross-flow Type Vertical Wind Power Generation System for Electric Energy Generation Using Convergent-Divergent Duct

Sang-Hoon Chung, Kwang-Seop Chung*, Chul-Ho Kim**†

NIT Fusion Graduate School, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

*School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

**Dept. of Automotive Engr., Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received June 17, 2011; revision received July 11, 2011)

ABSTRACT: New concept of wind energy conversion system is proposed to increase the energy density at a given working space. The quality of wind for wind power generation is depend on its direction and speed. However, the quality is not good on land because wind direction is changeable all the time and the speed as well. The most popularly operated wind turbine system is an axial-flow free turbine. But its conversion efficiency is less than 30% and even less than 20% considering the operating time. In this research, a cross-flow type wind turbine system is proposed with a convergent-divergent duct system to accelerate the low speed wind at the inlet of the wind turbine. Inlet guide vane is also introduced to the wind turbine system to have continuous power generation under the change of wind direction. In here, the availability of wind energy generation is evaluated with the change of the size of the inlet guide vane and the optimum geometry of the turbine impeller blade was found for the innovative wind power generation system.

Key words: CPT(Cross-flow Power Turbine), Vertical axis wind turbine(수직축 풍력터빈), Venturi system(벤츄리장치)

기 호 설 명

V : velocity [m/s]
 β_1 : impeller blade inlet angle [degree]
 β_2 : impeller blade exit angle [degree]
 r_1 : impeller tip radius
 r_2 : impeller hub radius
 i : indicated

b : brake

그리스 문자

ρ : density [kg/m³]

하첨자

m : mechanical
 T : Turbine
 G : Generator
 B : Blocking
 n : normal

† Corresponding author

Tel.: +82-2-970-6347; fax: +82-2-979-7032

E-mail address: profchkim@seoultech.ac.kr

1. 서 론

화석에너지의 한계성과 그 소비에 따라 유발되는 지구온난화의 문제는 전 세계의 중요한 관심사로 대두 되었다. 이러한 문제의 해소 방안으로 자연계에 존재하는 신재생에너지의 개발에 관심이 집중되고 있으며 전 세계적으로 많은 R&D 투자가 집중적으로 이루어지고 있다. 신재생에너지의 한 종류인 풍력 에너지를 전기에너지로 변환하는 풍력 발전시스템의 가용성에서 가장 중요한 요소는 바람의 세기와 방향에 의해 결정되는 풍질(wind quality)이 된다.

일반적으로 육상 및 해상용 풍력발전 시스템에서 바람의 에너지를 기계적 회전일로 변환하기 위해 가장 기본적 원리인 Axial-flow Free Wind Turbine 형을 사용해 오고 있다.

축류형 풍력발전 시스템의 문제점은 바람의 방향이 매우 불규칙적인 지상에서는 풍력발전을 위한 가동률이 바람 방향의 영향을 받아 매우 낮다는 것이다. 국내의 육상풍력 자원이 우수하다고 평가된 제주도, 대관령 그리고 포항해안 지대에 풍력발전 단지가 설치되어 운영되고 있으나 그 연간 가동율은 30%의 수준에 도달 하지 못하고 있는 실정이다. 이러한 관점에서 본 연구에서 개발하고자 하는 풍력 발전 시스템은 터빈의 형태가 기존의 축류형이 아닌 횡류형 터빈을 적용한 발전시스템이며 또한 저 유속의 유체를 가속시키기 위한 벤투리원리를 이용한 축소-확대관을 적용한다. 바람의 방향에 상관없이 바람의 속도가 일정할 때에는 항상 발전이 가능하다는 장점 뿐만 아니라 Fig. 1에서 보면 전체 형상이 구조물의 형태로 층층이 쌓을 수 있어 바람 에너지의 밀도를 증가시킬 수 있는 큰 장점이 있다.

본 연구에서 개발하고자 하는 수직풍력발전 시스템은 1개 층에서 25~30 kW급 발전용량이 요구되며, 이러한 발전용량의 풍력발전시스템의 개발을 위해 에너지의 가용성시험 평가와 횡류형 임펠러의 최적화 설계안을 도출하는데 연구의 목표를 두고 있다.

2. 풍력에너지 가용성 평가

2.1 이론적 근거

Fig. 2와 같이 폭이 50 m인 풍력타워 형상을 기준으로 바람의 속도변화(2.0 m/s~14.0 m/s)와 풍력타워의 폭 변화(24 m~50 m)를 고려하여 가용 풍

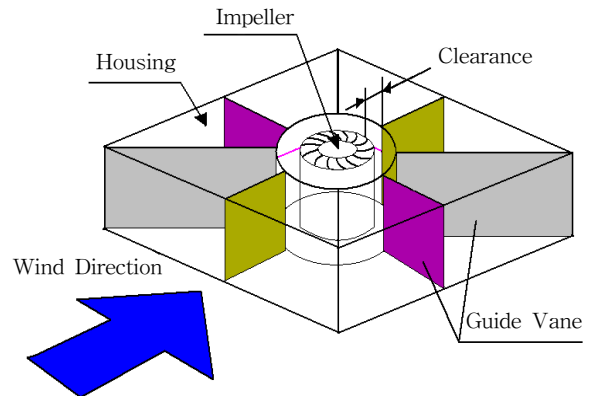


Fig. 1 Prospective view of the proposed cross flow vertical wind turbine system.

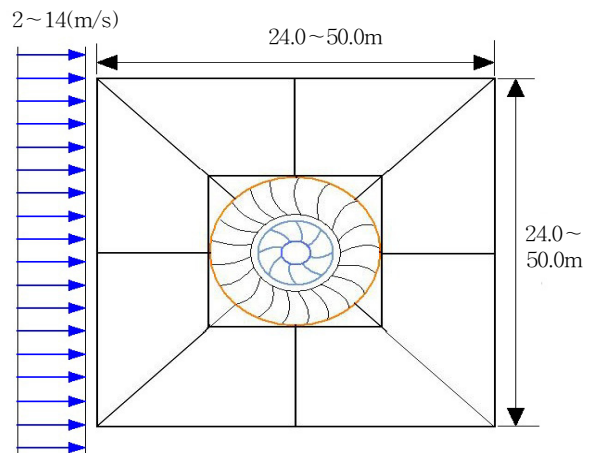


Fig. 2 Top view of the proposed wind power generation system; (24×24 m² ~50×50 m²).

력에너지의 크기를 유체동역학의 운동량방정식을 이용하여 예측해 보았다.

가용에너지 산출을 위한 조건 :

- (1) 공기의 조건 : 25℃, 1 atm, 1.184 kg/m³
- (2) 작동 조건 : 바람의 방향과 세기가 일정
- (3) 발전 구성품의 효율 :

- 풍력터빈 효율(η_T) : 75%
- 동력전달계 기계효율(η_m) : 85%
- 발전기의 효율(η_G) : 85%
- 작동조건의 효율 : blocking 효율(η_B) : 80%

에너지 산출을 위한 이론정리 :

- 유입공기의 질량유량

$$\dot{m}_{air} = \rho A V_{wind} \tag{1}$$

- 유입공기의 관성모멘트

$$F = \dot{m}_{air} V_{wind} \quad (2)$$

- 유입공기의 운동에너지

$$iPower_{air} = \frac{1}{2} \dot{m}_{air} V_{wind}^2 \quad (3)$$

- 손실을 고려한 유입공기의 에너지

$$rPower_{air} = \frac{1}{2} \dot{m}_{air} V_{wind}^2 \eta_{total} \quad (4)$$

여기서

$$\eta_{total} = \eta_T \times \eta_m \times \eta_G \times \eta_B$$

2.2 가용에너지의 분석

Fig. 3은 설계된 모델 풍력발전 시스템의 외기조건 변화에 따른 가용 풍력에너지의 크기를 나타낸다. iPower는 시스템에서 발생하는 손실계수의 값을 고려하지 않은 상태에서 기대되는 발전용량이며 rPower는 4가지의 중요한 손실계수를 고려하여 산출한 기대되는 발전용량이다.

10 m/s의 유입풍속에서 55 kW 이상의 가용전기 에너지가 생산될 수 있으며, 10 m/s의 풍속에 도달하게 되면 1기의 발전량이 100 kW 이상을 발전이 가능하다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 손실이 고려된 경우(rPower) 풍력타워 1기에서 유입 풍속이 8.0 m/s에 도달할 때 발전 기대치의 28.3 kW가 예상되며 Fig. 4에서는 일정한 바람의 유입속도의 조건에서 타워의

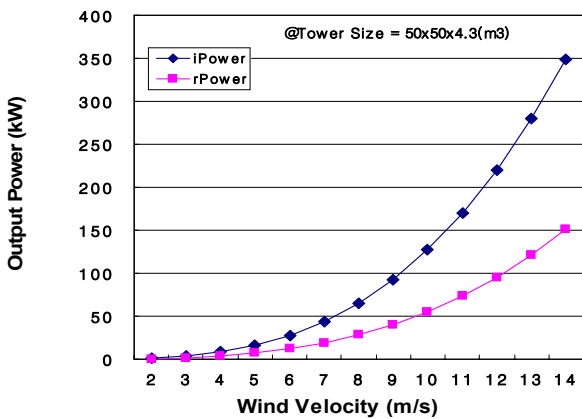


Fig. 3 Variation of indicated and brake power of the wind power generation system (50x50m²) with wind speed.

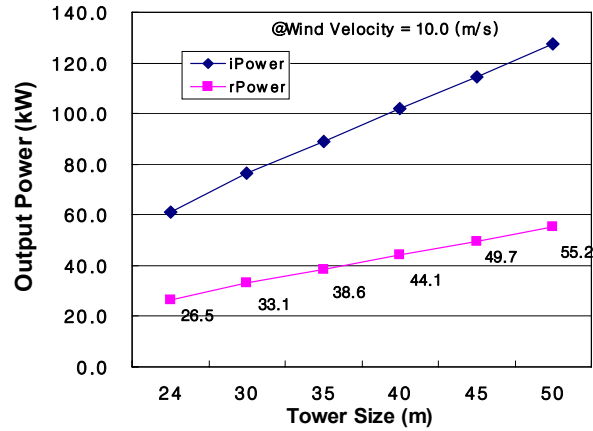


Fig. 4 Variation of indicated and brake power of the wind power generation system with tower size at a given wind speed(10 m/s).

크기가 증가할수록 발전에너지가 증가함을 보이며 타워의 크기가 35 m일 경우 설계 기대치인 38.6 kW 정도의 발전용량이 기대된다.

2.3 효율성과 경제성 판단

현재 개발 중인 횡류형 수직풍력발전 시스템은 바람의 방향에 상관없이 바람의 속도가 일정할 때에는 항상 발전이 가능하다는 매우 큰 장점을 가지고 있으므로 발전시스템의 가동률이 외기 바람의 속도가 유지되는 조건하에서는 90% 이상의 가동률을 보일 것으로 기대된다. 즉 기존의 시스템에 비해 2배 이상의 발전효율이 있을 것으로 기대된다.

Fig. 5에서 보여주듯이 풍력타워의 크기가(50x50x4.3 m³)인 풍력발전 시스템에서 외기의 속도가 7 m/s

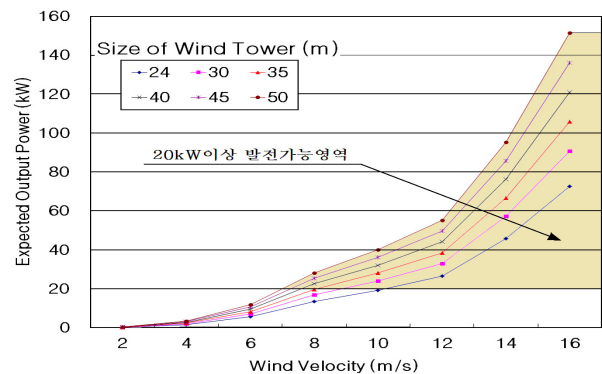


Fig. 5 Expected power generation at the various operating conditions with the vertical cross-flow wind power generation system.

이상일 때 기대하는 발전용량은 20 kW 이상의 발전이 가능한 풍력발전 시스템의 개발이 가능한 것으로 판단되며 9 m/s 이상의 바람에서는 규모가 작은 풍력타워(24×24×4.3 m³)급에서도 기대하는 발전용량 20 kW 이상의 발전이 가능하다고 판단된다.

3. 설계이론

3.1 임펠러 설계이론

본 풍력발전 시스템에 도입되는 풍력터빈은 횡류형 수직터빈으로 터빈 임펠러의 이론 설계는 운동량 보존의 법칙에서부터 시작된다. 이때 회전운동을 하는 터빈 임펠러 날개의 설계는 각운동량 방정식을 적용하게 된다.

아래의 Fig. 6에서처럼(x-y) 평면상의 원점에서 (r) 반경의 거리에 위치한 미소체적의 물체가 임의 방향으로(dF)의 힘을 받았다고 가정하자 이때 이 미소 체적을 터빈 회전날개로 가정할 수 있다.

외부로부터 터빈의 임펠러 날개가 받게 되는 힘의 작용력(dF)는 반경(r) 방향에 수직방향과 수평방향의 힘으로 나누어 생각 할 수 있다. 미소물체를 회전시키려는 힘은(dF_t)의 성분이며 이때의 회전토크(dT_s)의 크기는

$$dT_s = rdF_t \tag{5}$$

여기서 dF_t 는 선형운동량 방정식으로부터 산출할 수 있다.

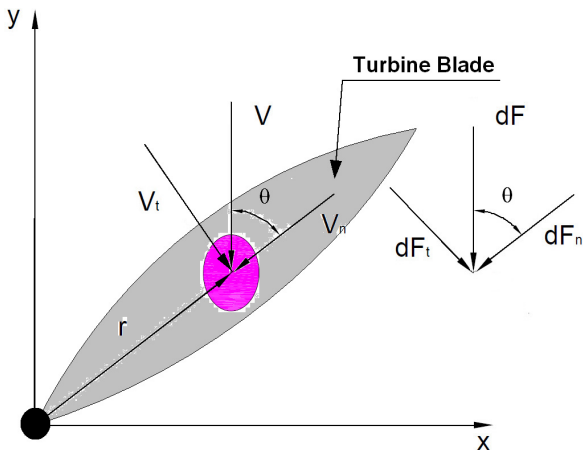


Fig. 6 Available angular momentum energy on an object.

$$\sum F_t = \iint_{CS} V_t \rho V_n dA + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} T_t \rho dV \tag{6}$$

전체 각운동량의 식은

$$T_s = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} (\vec{r} \times \vec{V}) dm + \iiint_{CV} (\vec{r} \times \vec{V})(\rho \vec{V} \times d\vec{A}) \tag{7}$$

정상상태(steady-state) 식은

$$T_s = \iint_{CS} (\vec{r} \times \vec{V})(\rho \vec{V} \times d\vec{A}) \tag{8}$$

3.2 임펠러의 입 · 출구 각도 결정

풍력터빈 임펠러의 입출구 각도(β₁, β₂)의 결정은 풍력터빈의 출력을 결정하는 매우 중요한 설계인자이다. 임펠러 유입각도(β₁)는 터빈 임펠러의 원주 속도의 상대속도(V_{r1})에 의해 결정되며, 출구각도(β₂)는 터빈의 요구출력을 고려하여 결정하게 되는데 이때 임펠러 출구각도의 크기가 클수록 터빈의 출력은 증가하게 되나 지나치게 커지게 되면 날개 깃 내부에서 와류발생으로 인해 출력이 오히려 감소하게 된다.

결정된 임펠러 날개의 입출구 각도로 부터 오일러 운동량 방정식에 적용하여 설계된 터빈의 토크와 발생동력을 산출할 수 있다.

임펠러 회전축에서의 토크

$$\tau_s = \rho \dot{Q}(r_1 V_{1t} - r_2 V_2) \tag{9}$$

여기서

$$V_{1t} = \omega r_1, \quad V_{2t} = \omega r_2 - \frac{V_{2n}}{\tan \beta_2}$$

$$\dot{Q} = AV$$

여기서 A : 임펠러의 공기유입면적
(날개의 높이×바람의 유입폭)

최종적으로 설계된 터빈 임펠러에서 발생동력의 크기는

$$Power = N \times \tau_s = \frac{2\pi N}{60} \times \tau_s \tag{10}$$

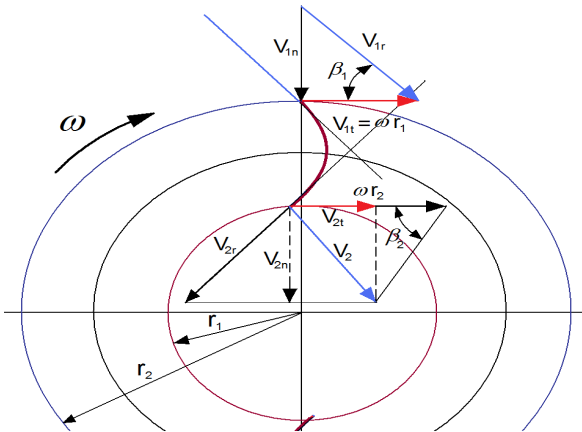


Fig. 7 Velocity triangles at the inlet and outlet of an impeller blade.

4. 설계 풍력터빈의 성능분석

본 연구에서 개발된 터빈 임펠러 날개의 출구각(β_2), 회전수, 날개 수의 변화에 따른 임펠러의 출력(kW) 변화를 산출해 보았다. 아래 Table 1은 설계

Table 1. Important variables and their ranges to decide the performance of the turbine impeller

	Angle(β^2)	RPM	No. of Blade
1	80°		
2	70°		
3	60°	20~50	8~28
4	50°		

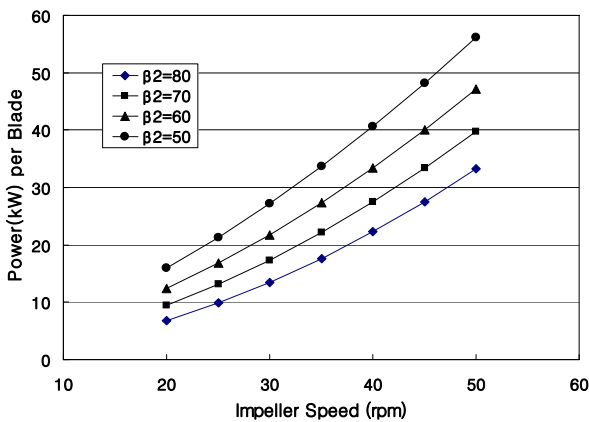


Fig. 8 Brake power of an impeller blade with the change of the exit angle(β_2) and the rotational speed(rpm) of the turbine impeller; wind speed = 10m/s, clearance = 0.1m, (H/T)r = 0.5.

임펠러의 출력성능 평가를 위한 주요 설계변수의 범위를 보여준다.

Fig. 8은 날개갯이 16개인 터빈 임펠러에서 날개 출구각도(β_2)의 변화에 따라 생산되는 날개 1개당의 출력에너지 값의 변화를 산출해 본 결과이다. 임펠러에서 생산되는 총 유효출력은 유효 날개의 개수를 곱함으로써 예측할 수 있다.

출력의 결과를 보면

(1) 임펠러 출구각도(β_2)에 관계없이 터빈의 회전수가 증가할수록 출력이 증가한다는 사실을 알 수 있다.

(2) 임펠러 출구의 각도(β_2)가 감소할수록 출력이 증가한다는 사실을 알 수 있다. 즉 출구 각도(β_2)가 증가함은 입구 각도(β_1)에 비해 많이 꺾어짐을 의미한다. 그러나 출구각의 크기가 어느 범위를 벗어나게 되면 터빈 날개의 표면에서 흐름이 분리되는 현상으로 인해 오히려 출력이 감소되는 현상을 나타나기 때문에 실험적 연구의 결과가 병행되어 출구각을 선정하여야 한다.

Fig. 9에서는 날개 출구각도(β_2)를 80도로 고정하고 임펠러의 회전수 및 날개의 개수변화에 따른 임펠러 날개 1개에서 생산되는 출력에너지의 크기를 나타낸다.

출력의 결과를 보면

(1) 터빈의 회전수가 증가할수록 날개의 개수에 상

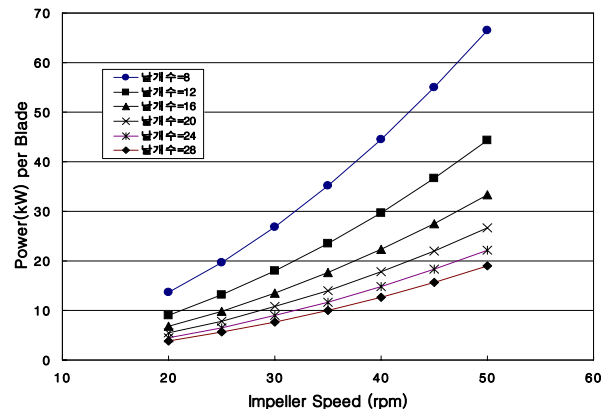


Fig. 9 Brake power of an impeller blade with the number of impeller blade and the rotational speed(rpm) of the turbine impeller; wind speed = 10m/s, clearance = 0.1m, (H/T)r = 0.5, outlet degree(β_2) = 80.

관없이 출력에너지가 증가한다는 사실을 알 수 있다.

(2) 임펠러 날개의 개수가 증가할수록 날개 1개당 출력에너지가 감소한다는 사실을 알 수 있다. 그러나 총 출력에너지는 날개 1개당의 유효에너지를 유효한 날개의 개수만큼 곱해 줌으로써 구할 수 있으므로 임펠러당의 총 출력은 날개의 개수가 많은 터빈이 증가하게 된다.

5. 결 론

본 연구에서 개발하고자 하는 횡류형 수직풍력발전시스템의 풍속변화에 따른 가용 출력에너지의 크기 변화를 통해 확보 가능한 풍력에너지의 크기를 예측해 보았다. 본 풍력발전 시스템에서 도입하고자 하는 풍력터빈은 횡류형으로 기존의 축류형 풍력터빈에 비해 효율이 15% 이상 높다.

또한 가동을 역시 본 연구에서 개발하고자 하는 풍력발전 시스템의 경우 바람의 방향에 크게 영향을 받지 않으므로 기존의 축류형 풍력발전 시스템에 비해 연간 가동율이 2배 이상 나올 것으로 판단되며 설계단계에서 풍력발전용 구조물의 크기변화에 따라 다양한 발전용량의 풍력발전 시스템을 설계/개발할 수 있을 것으로 판단된다.

현재까지의 연구를 통해 본 풍력발전 시스템에서 개발하고자 하는 횡류형 수직 풍력발전 시스템의 에너지 효율성을 판단할 수 있었으며 또한 터빈설계의 4가지 주요 변수연구를 통해 개발 목표인 2 MWh 급 풍력발전 시스템의 형상 규모를 예측 할 수 있었다.

추후 연구방향으로는 본 논문에서 언급하였던 풍력발전 시스템의 4가지 주요 설계변수의 실험적 접근을 통해 이론적으로 규명하였던 최적의 값을 확정적으로 도출하여야 하며, 이어서 프로토타입의 실물 풍력발전 시스템을 제작하고 실증연구를 통해 발전성능을 검증하여 최종적으로 최적의 수직풍력발전 시스템 설계 안을 도출하는 절차로 연구가 진행되어야 한다.

후 기

본 연구는 2010년도 한국연구재단의 지원(R01-2008-000-20066-0, KOSEF, 교육과학기술부 특정기술 연구사업)에 의해 수행된 연구내용이며, 지원에 감사드립니다. 또한 연구수행에 필요한 자료를 제공해 주신 제이케이이엔지(주)에도 감사드립니다.

참고문헌

1. Yunus, A. C. and John, M. C., 2010, Fluid Mechanics Fundamentals and Applications, McGrawHill, 2nd Edition, pp. 807-831.
2. Ha, J. H., Kim, H. C. and Kim, C. H., 2007, A Numerical Study on an Optimum Design of a Cross-flow Type Power Turbine(CPT), Trans. KSME, pp. 123-127.
3. Ha, J. H., 2010, An Optimum Design of Corss-flow Power Turbine(CPT) System for the Application of Aerodynamic Energy on a Running Vehicle, Doctor Thesis, National University of Science and Technology, Seoul, Korea, pp. 16-27.
4. Douglas, J. F. et al., 2001, Fluid Mechanics, Prentice Hall, pp. 406-447.
5. Olson, R. M. and Wright, S. J., 1990, Essentials of Engineering Fluid Mechanics, 5th ed., Harper and Row, Publishers Inc.
6. Kim, H., Ha, J. and Kim, C.-H., 2007, A numerical study on the aerodynamic effect of a rear-side guide vane(RGV) on a recreational vehicle, Spring Conference of KSAE, pp. 894-898.
7. Ha, J. and Kim, C.-H., 2008, A Study on an Aerodynamic effect of a Rear Upper Guide system on the heavy truck, Int, Automotive Technology, Vol. 2, No. 2, pp. 1093-1098.